



TITLE:

Linear and Nonlinear Functions of Plasmas in Electromagnetic Metamaterials(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Iwai, Akinori

CITATION:

Iwai, Akinori. Linear and Nonlinear Functions of Plasmas in Electromagnetic Metamaterials. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21732>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020-03-20に公開; 許諾条件により要旨は2019-03-30に公開

京都大学	博士（工 学）	氏名	岩 井 亮 憲
論文題目	Linear and Nonlinear Functions of Plasmas in Electromagnetic Metamaterials (電磁メタマテリアルにおけるプラズマの線形及び非線形機能)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、高密度な負誘電率プラズマと負透磁率メタマテリアルの組み合わせより得られる「プラズマメタマテリアル」の電磁的特性を評価したものである。本論文では、大電力マイクロ波放電又はガス封入放電管により実現された高密度プラズマと負透磁率メタマテリアルを対象とした実験、及び電磁粒子シミュレーションを行っており、6章から成っている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の背景となるメタマテリアルの基本概念や歴史的経緯について概説している。とりわけ、本論文で用いる負透磁率メタマテリアルである「二重分割リング共振器アレイ (DSRR)」の動作原理を詳説し、DSRRによって実現された非線形メタマテリアルについても述べている。また、プラズマメタマテリアルに関する先行研究を例示し、DSRRを用いたマイクロ波プラズマ生成実験においては電子密度測定のみ、計算機シミュレーションにおいては低温プラズマと均一な負透磁率媒質を仮定した空間における電磁波伝搬の観測のみに留まっていることを指摘した。</p> <p>第2章では、DSRRを設置した矩形導波管内に生成された高密度プラズマへの高効率電力入射及び高強度二次高調波生成について述べている。DSRR基板間に生成されるプラズマは負誘電率となる高密度状態であるにも関わらず、入射マイクロ波が効率的に後方まで透過し、入射電力増加に呼応して透過強度が増加することを確認した。更に、DSRR内でのプラズマ生成に起因する二次高調波は、従来のマイクロ波プラズマよりも飛躍的に高強度となり、効率的な電力注入による基本波強度の増加では説明できないことを述べた。そこで、DSRRとプラズマが両者の界面に必ず現れるプラズマシースを介して電氣的結合を持つ場合に非線形電流が誘起されることに着目し、回路モデルによる解析と測定結果との定量的な比較から、両者の結合とDSRRによって生じる空間不均一な電子密度分布が二次高調波生成源であることを明らかにした。</p> <p>第3章では、前章で述べたDSRRとプラズマの結合によって引き起こされる不均一なプラズマ生成について述べている。DSRRからの距離が異なる点での単探針法によるプラズマ測定から、共振構造のごく近傍のみにおいて電子温度が特異的に高くなることを確認した。更に、平滑化処理を施したプローブ測定結果より推定された電子エネルギー分布関数も高温電子の積極的な生成を示していることを確認した。プラズマ装置の中で生じる衝突性又は非衝突性加熱機構を取り上げ、電磁界強度測定結果と合わせた考察によって、磁気共振下のDSRRに引き起こされる表面電位の時間変化がプラズマシースポテンシャルの激しい変動を生じさせ、跳ね返される電子がエネルギーを受け取る非衝突性の統計的加熱が局所的に発生していることを明らかにした。</p> <p>第4章では、電磁粒子シミュレーションによる負透磁率空間における高密度プラズマ内の電磁波伝搬について述べている。負透磁率は磁束密度ベクトルに呼応して生成される磁流を仮定することで表現し、複合体内においてエネルギー伝搬速度と位相速度が逆符号となる負屈折率状態が実現されていることを確認した。更に、入射波長の1/5の単位構造長を持つ負透磁率メタマテリアルと高密度プラズマの複合体においても負屈折率状態が維持されていることを明らかにした。プラズマに含まれる電子の</p>			

京都大学	博士（工 学）	氏名	岩 井 亮 憲
<p>熱運動を考慮した分散関係を理論的に求め、位相速度が電子の熱速度と近くなった場合に電磁界エネルギーが電子へ移る非線形加熱が横波においても発生することを明らかにし、電磁粒子シミュレーション結果とも非常に良い一致を示した。負透磁率効果による高密度プラズマ内への効率的な電磁波入射によって、ローレンツ力に起因する二次高調波が高密度プラズマ全域で生成されることを確認した。</p> <p>第5章では、プラズマ放電管アレイと DSRR の複合体が持つ電磁波透過特性と電子密度による屈折率の制御性について述べている。DSRR 基板空隙に高密度プラズマ放電管を波長より十分短い周期で配列し、負誘電率バルクプラズマと負透磁率メタマテリアルの協調空間を実現した。マイクロ波帯での透過測定より、誘電率と透磁率が共に負となる周波数帯に明確な透過ピークの出現を確認した。また、放電管内の電子密度低下によって、負透磁率帯のピーク強度は抑制され、正透磁率帯の透過強度は回復することを明らかにした。更に、異なる DSRR を用いた対照実験結果より、透過ピークは負透磁率効果によって得られていることを確認した。負屈折率媒質が持つ散乱行列を理論的に求め、透過信号の振幅及び位相の周波数特性が実測結果と定性的に良い一致を示していることから、複合体が可変負屈折率媒質を実現していることを強調した。</p> <p>第6章では、本論文で得られた成果の要約、及び提案可能な応用について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は気体プラズマとメタマテリアルを複合させた「プラズマメタマテリアル」の持つ線形及び非線形特性についての研究をまとめたものである。本論文は以下の成果から成っている。

1. 負透磁率メタマテリアルを設置した空間で大電力マイクロ波によるプラズマ生成を行い、従来よりも高効率で電力が入射され、高強度二次高調波が生成されることを明らかにした。負透磁率効果のみならず、メタマテリアルの構成要素である共振構造とプラズマの電氣的結合による非線形誘導電流が、二次高調波生成の主たるメカニズムであることを生成効率の定量評価より明らかにした。一方、共振構造による局所強電界と電氣的結合によるプラズマシース変動が、プラズマ中の電子を効率的に加熱し、空間的に不均一なプラズマを生成していることも明らかにした。
2. 負透磁率効果を含めた電磁粒子シミュレーションを用い、荷電粒子の運動や熱効果等の非線形性を含めたプラズマメタマテリアルを再現した。高密度プラズマと負透磁率連続媒質によって負屈折率状態が実現され、入射波長の $1/5$ の単位構造長の負透磁率媒質を仮定した場合においても負屈折率が維持されることを明らかにした。更に、負屈折率となる周波数帯での電子と電磁波の横波成分との非線形エネルギー授受、ローレンツ力による効率的な二次高調波生成についても、理論計算及びシミュレーションの両面より解明した。
3. 負透磁率メタマテリアルとプラズマ放電管アレイを複合させ、上記 2 で実現された負屈折率状態の実証実験を行った。誘電率と透磁率が同時に負となる帯域で小電力マイクロ波の異常透過現象が発生し、透過強度が電子密度変化によって連続的に制御され、かつ透磁率の符号によって変化が逆特性となることを明らかにした。更に、負屈折率状態の透過強度・位相変化の周波数特性の理論計算結果と実測結果の良い一致が見られた。すなわち、可変な負屈折率媒質の特性を実験的に観測した。

本研究はプラズマメタマテリアルによる負屈折率の実現、高密度プラズマ生成、高強度二次高調波生成を実証したものであり、プラズマ工学およびメタマテリアル工学の両分野へ大きく貢献するものである。プラズマが持つ時空間双方の制御性は電磁波制御技術に重要な進展をもたらすと期待されるものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 2019 年 3 月 30 日

